

航空发动机转子盲腔螺栓拧紧技术研究进展

李兆宇¹, 李小强¹, 张鹏飞², 薛立仲¹, 张宗江¹, 赵 罡^{1, 2}

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191)

摘 要: 综述了航空发动机转子盲腔螺栓拧紧技术的研究现状。以转子盲腔螺栓拧紧的技术需求为牵引, 从拧紧工艺、拧紧装备以及拧紧检测 3 个方面展开论述。首先, 围绕转子止口配合和螺栓连接两个阶段总结了止口压装工艺、力矩转角法和多轴拧紧法等优化工艺; 其次, 围绕装备构型设计和精度控制方法两个方面, 总结了拧紧装备的力矩传递方式、机构展开方式、整体构型发展以及螺栓定位和拧紧精度控制方法等研究成果; 最后, 围绕螺栓拧紧的检测方法, 总结了当前拧紧力矩、转角和预紧力的检测技术。研究结果表明: 为彻底突破转子盲腔狭小空间的限制, 提升转子装配质量, 盲腔螺栓拧紧技术将向着压装-拧紧-测量一体化、机器人智能拧紧以及多模态融合测量的方向发展。

关 键 词: 航空发动机转子; 盲腔螺栓; 拧紧工艺; 拧紧装备; 拧紧检测

中图分类号: V229⁺.1

文献标志码: A

Research progress of blind cavity bolt tightening technology for aeroengine rotors

Li Zhaoyu¹, Li Xiaoqiang¹, Zhang Pengfei², Xue Lizhong¹,
Zhang Zongjiang¹, Zhao Gang^{1, 2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The current research status of blind cavity bolt tightening technology for aircraft engine rotors was summarized. Guided by the technical requirements for tightening bolts in rotor blind cavities, three aspects were discussed: tightening process, tightening equipment, and tightening inspection. Firstly, focusing on the two stages of rotor rabbet fit and bolt connection, optimized processes such as rabbet press-fitting process, torque-rotation angle method, and multi-axis tightening method were summarized. Secondly, focusing on equipment configuration design and accuracy control methods, research results such as torque transmission methods of tightening equipment, mechanism deployment methods, overall configuration development, as well as bolt positioning and tightening accuracy control methods were summarized. Finally, focusing on bolt tightening inspection methods, current detection technologies for tightening torque, rotation angle, and pre-tightening force were summarized. The research results indicate that to fully overcome the limitations of the narrow space in rotor blind cavities and enhance rotor assembly quality, the blind cavity bolt tightening technology will develop towards an integrated process of

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 国家科技重大专项(J2022-VII-0001-0043); 冗余自由度工业机器人项目(2024ZY01050)

作者简介: 李兆宇(1993—), 男, 博士生, 主要从事航空制造工艺与装备方面的研究。E-mail: lzy24@buaa.edu.cn

通信作者: 张鹏飞(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事智能装配与机器视觉技术方面的研究。E-mail: ftd423@buaa.edu.cn

引用格式: 李兆宇, 李小强, 张鹏飞, 等. 航空发动机转子盲腔螺栓拧紧技术研究进展[J]. 航空动力学报, 2027, 42(1): 20250177. Li Zhaoyu, Li Xiaoqiang, Zhang Pengfei, et al. Research progress of blind cavity bolt tightening technology for aeroengine rotors[J]. Journal of Aerospace Power, 2027, 42(1): 20250177.

press-fitting, tightening, and measurement, intelligent robotic tightening, and multi-modal fusion measurement.

Keywords: aeroengine rotor; blind cavity bolt; tightening process; tightening equipment; tightening measurement

转子组件作为航空发动机高速旋转的承力部件,具有空气压缩、气动做功、动力传递等关键作用。转子零部件结构形式主要为盘鼓式结构,零部件之间普遍采用螺栓阵列的形式进行连接,螺栓阵列均匀分布在内翻形式的法兰安装边上^[1]。由于盘鼓式结构具有复杂紧凑的特点,螺栓连接完成后容易形成目光不可直达的狭窄内部腔体(后文简称为“盲腔”),由此给螺栓拧紧的操作带来了极大难度。由于转子组件处在高温、高压、高转速的工作环境中,受到复杂载荷(轴向拉压载荷、弯曲载荷等)的作用,与传统行业的螺栓紧固件相比,航空发动机转子装配过程的螺栓连接具有更高的质量要求。转子螺栓连接质量会直接影响到转子盘轴零件配合表面的密接程度、接触刚度、装配同轴度等^[2-3],进而影响到转子结构在动态循环载荷作用下的连接刚度(拉压、弯曲与扭转刚度),转子不平衡量与动力学响应特性^[4-6],最终影响到航空发动机整机性能。

盲腔螺栓阵列连接的技术装备及工艺方法在航空发动机转子精密装配技术研究及工程应用中都受到极高重视。当前,GE Aviation、Pratt & Whitney、Rolls Royce、Safran 等知名航空发动机公司经过长期的研发,在转子盲腔螺栓阵列精密连接工艺及其配套智能化、自动化操作装备领域已拥有大量成果以及工程经验的积累,如 GE90、PW-F119、Trent、LEAP 等先进航空发动机表现出了极高的使用性能。相比之下,国内航空发动机企业的发展起步晚,研究周期短,成果积累有限,整体还处于探索阶段^[7]。目前国内航空发动机主机厂所对转子盲腔螺栓的拧紧主要通过手动使用力矩扳手的方式实现,自动化水平整体较低,难以突破盲腔结构带来的限制,装配操作困难、作业周期长、连接质量不稳定等问题还比较突出。

综上,深入研究航空发动机盲腔螺栓连接问题,突破狭小空间内精密操控的智能化自动化工艺装备核心技术,对于推动转子组件装配连接典型难题的解决,促进我国航空发动机装配工艺技术进步和创新应用,有着极其重要的意义。为系统性梳理国内外关于盲腔螺栓拧紧技术的研究成

果,本文首先深入分析了盲腔螺栓拧紧的技术需求。在此基础上,围绕螺栓拧紧工艺的优化、拧紧装备的设计以及螺栓拧紧的检测技术等方面对转子盲腔螺栓拧紧技术进行归纳总结。最后对未来的发展方向提出了展望。

1 盲腔螺栓拧紧技术需求

以某型号航空发动机高压压气机转子为例,结合盲腔螺栓连接结构的特征以及螺栓拧紧工艺两个方面,对盲腔螺栓拧紧技术需求进行分析。如图 1(a)所示,高压压气机转子主要由 1~2 级鼓筒、3 级盘轴、4~9 级鼓筒以及叶片等零件组成,其中 2、3、4 级盘连接处为止口螺栓连接结构,装配流程为先通过热装的方式进行止口配合,此时在 3、4 级盘之间形成了盲腔结构,然后在盲腔中进行螺栓阵列连接,从而实现转子盘间的紧固。

盲腔结构的关键尺寸主要包括盲腔进深 H (转子操作入口平面至螺栓对应的转子盘上端面距离),转子最小内腔直径 d (盲腔轴向入口直径),转子盘间待拧螺栓所在分布圆直径 D ,盲腔最小高度 h (螺栓下端面至对应的转子盘上端面距离,称为盲腔径向入口高度)。其中, H 和 D 决定了螺栓拧紧操作路径的长度, d 和 h 决定了盲腔入口的大小。将 D 与 d 的比值称为盘径比,用 A 表示。如图 1(b)所示,当 $1 < A < 3$ 时,拧紧机构在盲腔中只需展开一次,其末端可到达待拧螺栓位置;当 $A \geq 3$ 时,拧紧机构需要完成两次展开,才可到达待拧螺栓处。实际上考虑到拧紧机构自身占用一定的空间, A 值判定边界通常在 2.5 左右。不同盲腔结构的尺寸有所差异,但普遍存在大进深,小入口的特征,部分盲腔结构还具有大盘径比的特征。

在螺栓拧紧过程中,当前国内主要使用力矩法的拧紧方法。对于多个螺栓的拧紧顺序,主要使用十字交叉法的方式,如图 1(c)所示。在上述型号的止口热装阶段,需要在 100 °C 以上的高温的环境下拧紧部分螺栓,在止口配合完成后的常温状态下,需要完成所有螺栓的拧紧工作。在拧紧力矩的工艺要求方面,当前多数盲腔螺栓拧紧

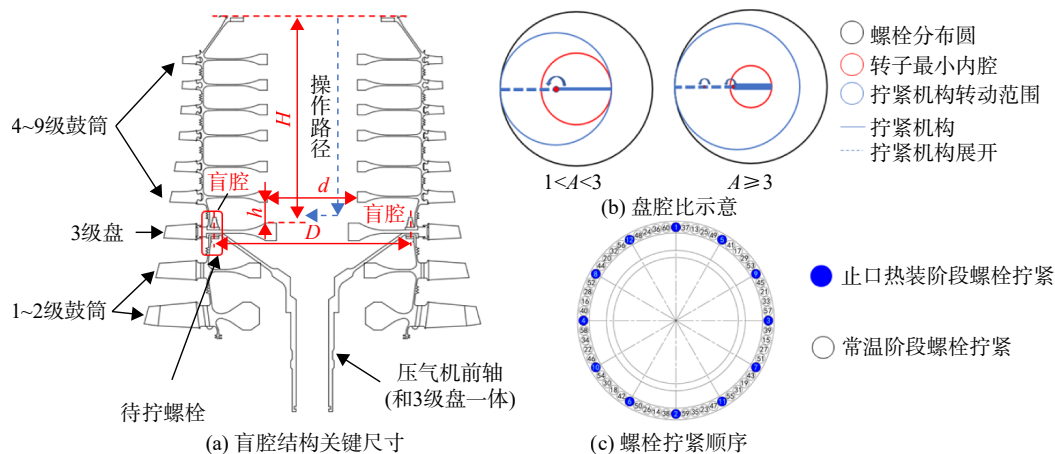


图1 转子盲腔结构及螺栓拧紧方式

Fig. 1 Rotor blind cavity structure and bolt tightening method

力矩的工艺要求在 $30 \sim 50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的范围, 比较大的拧紧力矩可到 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$, 其中对拧紧力矩的精度要求可达到 $\pm 2\%$ 的偏差范围。

根据上述分析, 将当前盲腔螺栓拧紧的技术需求总结如下:

1) 复杂装配流程下的拧紧工艺优化

盲腔螺栓拧紧贯穿在转子止口配合和盘间紧固两个阶段, 涉及高温环境下的止口压装方法、螺栓拧紧工艺方法等多个工艺。拧紧工艺不合理会造成螺栓预紧力分散程度较大, 影响转子装配的同心度以及连接刚度等性能, 进而影响到转子的平衡特性。因此, 需要以转子装配性能为评价指标, 对转子止口的压装工艺以及螺栓拧紧工艺展开研究。

2) 受限空间恶劣工况下的拧紧机构设计

大进深、小入口、大盘径比特征的盲腔结构, 给螺栓拧紧机构带来了操作空间的限制, 导致常规的拧紧机构难以满足在盲腔中到达待拧螺栓位置的可达性。同时由于拧紧机构的体积受限, 在承受大力矩载荷时容易发生变形或破坏。而长时间在大力矩载荷下工作会引起拧紧机构各个部件的磨损和老化, 造成结构损伤和材料疲劳, 最终导致拧紧机构使用寿命缩短和可靠性降低。

此外, 在力矩传递过程中, 拧紧机构的几何误差, 装配误差, 受力产生的变形误差, 以及受高温影响产生的变形误差等多源误差在长传递链下累积, 表现为非系统性时变误差, 难以对其进行准确补偿, 导致力矩和转角等拧紧工艺参数的精度在动态拧紧过程中难以得到准确控制, 从而无法满足拧紧工艺的指标要求。因此, 需要研究高可达性高精度高性能的螺栓拧紧装备。

3) 狭小空间多约束条件下的螺栓拧紧质量检测

由于螺栓拧紧力矩较大, 为实现大力矩的高精度测量, 常规的力矩传感器体积也会相应增大, 导致无法直接布置在盲腔狭小空间中。同理, 角度传感器也受到了狭小空间的限制, 难以直接测量拧紧转角。此外, 面向预紧力的测量方法不仅受限於狭小空间, 还受到了航空发动机装配过程多约束条件的限制, 如不能在转子内部残留多余物, 不能破坏螺栓等条件, 导致常规的超声测量法、嵌入应变片、嵌入光纤等方法难以适用。因此, 需要突破狭小空间的约束, 对无多余物非破坏性在位精准检测技术进行研究。

综上所述, 对航空发动机盲腔螺栓拧紧技术的研究应该以提升转子装配质量为目标, 以盲腔螺栓拧紧的需求为牵引, 以拧紧工艺为指导, 以拧紧装备为执行手段, 以测量技术为反馈手段, 相互支撑发展。

2 盲腔螺栓拧紧工艺

在转子装配流程中, 螺栓拧紧先后用于两个阶段: 转子止口配合阶段和转子盘间紧固阶段。在止口配合阶段, 通过螺栓拧紧完成压装工艺, 为止口配合面提供预压力。在盘间紧固阶段, 完成螺栓拧紧工艺, 为转子盘间连接提供预紧力。下文对这两个阶段的工艺研究进行总结。

2.1 止口压装工艺

以上述型号的高压压气机转子装配为例, 在转子止口配合阶段, 三级盘先与二级盘完成止口配合, 然后四级盘与三级盘完成止口配合, 如图2(a)所示。三级盘止口先被加热变形, 止口配合为

间隙配合状态,在三级盘冷却至室温的过程中逐渐收缩,通过拧紧螺栓阵列中的部分螺栓,在轴向对止口配合面施加预压力,从而保证止口配合面的贴合度。这种压装方式对螺栓预紧力一致性具有较高要求,当螺栓预紧力的一致性较差时,止口配合面难以获得均匀的预压力,导致止口配合面之间没有充分贴合,存在间隙,如图 2(b)所示。此外,在热载荷与螺栓预紧力耦合作用下,螺栓预紧力的不均匀性导致了螺栓连接的转子盘间产生了周向非均匀的变形量,在高温下该变形量的非均匀性增大,周向变形量的不均匀使得转子盘间产生相对滑移以及引起转子不平衡量的产生。此外,转子的加热方式也有一定影响,根据洪志亮等^[8]的研究,转子盘整体温度升高 100 ℃,相较于仅在盘缘加热 100 ℃ 的工况,导致的滑移量增加约为 3 倍。

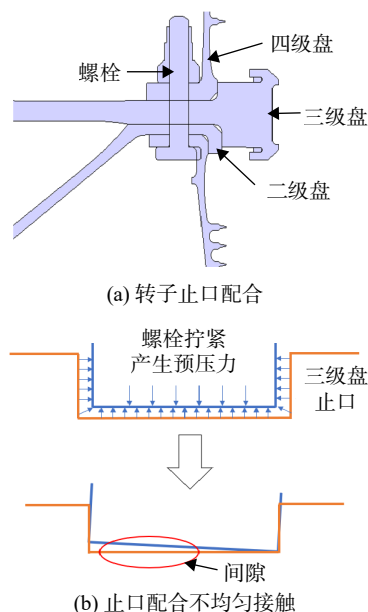


图 2 转子热装过程中的止口配合
Fig. 2 Rabbet fit during rotor hot assembly

针对传统的螺栓拧紧压装工艺存在的问题,当前主要研究方向是通过专用的压装设备代替螺栓拧紧的方式,压装设备中使用的压板相比螺栓增大了压紧面积,从而提高预压力的均匀性,实现更好的压装效果。郭钢毅^[9]对止口部位进行受力分析,发现当预压力大于止口过盈配合下产生的最大静摩擦力时,止口配合面没有间隙,并会产生一定的压力,如图 3(a)所示。又进一步进行有限元仿真分析,通过判断止口配合面的间隙大小,推断出合理的预压力大小,如图 3(b)所示。

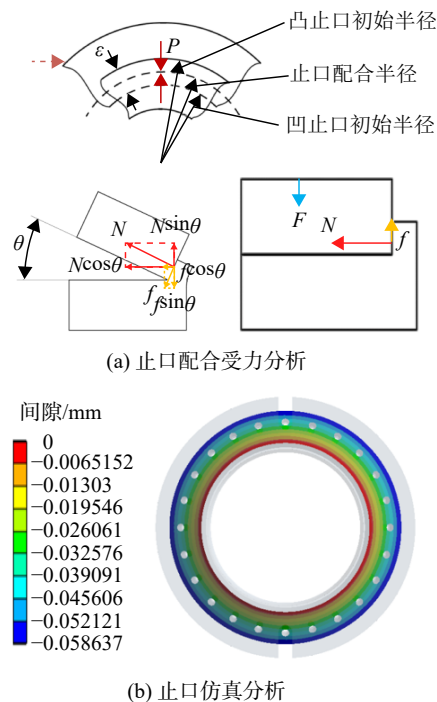


图 3 压装工艺机理分析^[8]

Fig. 3 Analysis of the mechanism of press-fit process^[8]

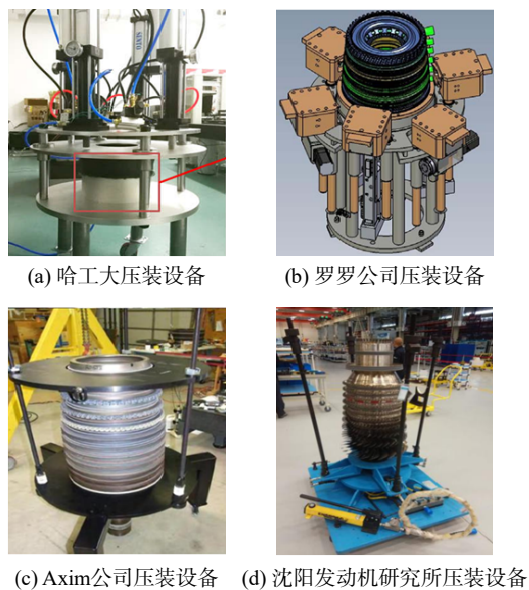
Wang、梁利华等^[10-11]研究了止口配合过程中在不同过盈量下压装力与压入位移的关系,得到了不同过盈量下的最大压装力,以及止口配合过程中的应力分布。李泽林^[12]通过建立结合面微观单元模型,表示止口配合面的贴合程度,认为止口接触面的接触间隙距离大小和外载荷在接触凸点上的等效力成线性正比关系,并通过测量端面跳动表示出间隙的变化。

基于上述压装方法的机理分析,国内外学者又进一步进行了压装设备的研究和应用。通过液压、气压以及电动机驱动压板运动的方式,在转子热装过程中提供均匀稳定的预压力,大幅减小了止口贴合面之间的间隙,提高了转子装配的同轴度以及压装的效率。哈尔滨工业大学^[12]、Axim 公司^[13]、劳斯莱斯公司^[14]、沈阳发动机研究所^[15]都研制了相关的压装设备,如图 4 所示。上述工艺装备实现了施加压紧力的均匀性,然而在压装工艺在与拧紧工艺结合时仍面临一些问题,例如压紧力的保持时间:从施加压紧力开始,取消压紧力的时间节点包括了在螺栓拧紧前,螺栓拧紧过程中以及螺栓拧紧完成后,不同的保持时间对转子装配质量有何影响目前缺少充分研究。

2.2 螺栓拧紧工艺

2.2.1 力矩转角法

常见的螺栓拧紧方法包括力矩法、力矩-转角

图4 国内外压装设备^[12-15]Fig. 4 Press-fit equipment at home and abroad^[12-15]

法、屈服点法、伸长量检测法等^[16],其中力矩法凭借操作简单,成本较低的优势得到了广泛的应用。但由于受摩擦影响较大,导致螺栓预紧力精度很差,误差范围可达到 $\pm 25\% \sim \pm 30\%$ ^[17]。其他方法可有效提高螺栓预紧力的控制精度,但屈服点法和伸长量检测法使用条件要求较高,难以应用在盲腔螺栓连接中^[18]。目前,当前主要采用力矩-转角法作为优化的拧紧工艺方法。力矩-转角法主要是基于预紧力-转角在螺栓的弹性变形阶段的线性关系^[19],如图5所示。在螺栓拧紧过程中,并不是直接进入弹性变形阶段,而是先进入螺母端面与被连接件的贴合阶段。在此过程中,螺栓预紧力仍受摩擦影响,需要先确定力矩转角法中的螺栓贴合力矩。然后在螺栓伸长量进入弹性变形阶段后,控制螺栓拧紧转角,此时螺栓预紧力不受摩擦因素的影响^[20]。

李小强等^[21]针对TC4钛合金材料的航空发

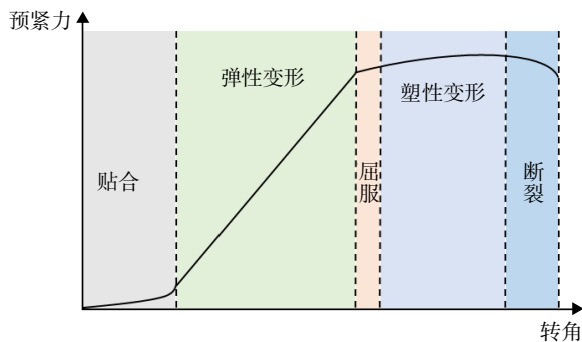
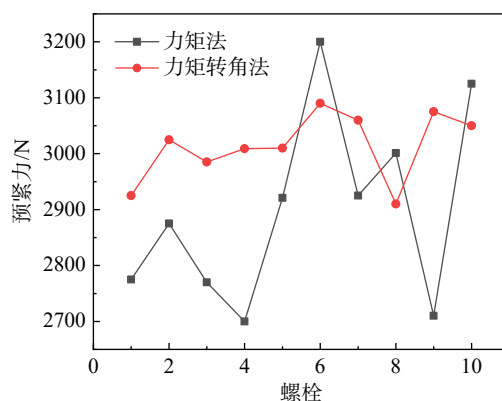


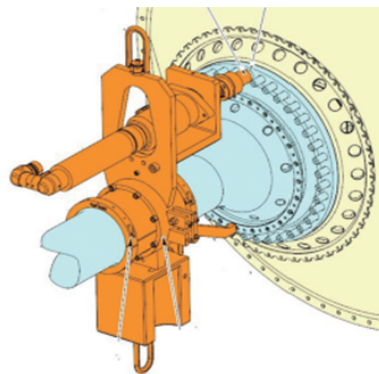
图5 预紧力-转角关系

Fig. 5 Relationship of the preload and angle

动机螺栓连接,研究了力矩-转角法对力矩法的优化效果,通过试验分析,得出力矩法下得到的螺栓预紧力标准差大致是力矩-转角法的3倍,如图6所示。陈津等^[22]针对航空发动机含自锁力矩的螺栓连接,提出了基于自适应贴合力矩的螺栓力矩转角拧紧方案,研究合理的贴合力矩,并使用有限元仿真和试验的方法进行验证,确定出动态力矩转角法的最优拧紧方案。此外,张博超^[23]针对低压涡轮转子螺栓连接结构,研究了力矩转角法的应用,通过试验的方法确定了初始贴合力矩以及转角值等参数。

图6 力矩法和力矩转角法的试验研究^[21]Fig. 6 Experimental study on torque method and torque-angle method^[21]

基于先进的自动化拧紧设备,可以将上述优化的拧紧工艺应用在航空发动机转子盲腔螺栓拧紧过程中。通过对拧紧力矩,拧紧转角,拧紧顺序等工艺参数的精确控制,实现螺栓拧紧质量的提升。以某在役型号航空发动机低压转子装配为例^[24],如图7所示,按十字交叉法的拧紧顺序将螺母以设定的速度拧紧到贴合力矩,再旋转目标角度,完成螺栓拧紧。这种方法当前的不足之处在

图7 力矩转角法的应用^[24]Fig. 7 Application of torque angle method^[24]

于力矩/转角传感器受限于盲腔空间,只能安装在拧紧轴前段,控制输入端的力矩/转角,然后通过校准法来间接控制输出端的力矩/转角,在控制精度上还需进一步提升。

2.2.2 多轴拧紧法

由于多个螺栓之间存在拧紧的先后顺序,先拧紧的螺栓预紧力大小会在后面的螺栓被拧紧时发生多次变化,这种现象称为弹性相互作用,如图 8 所示。弹性相互作用是造成螺栓阵列预紧力存在分散度的重要原因^[25]。

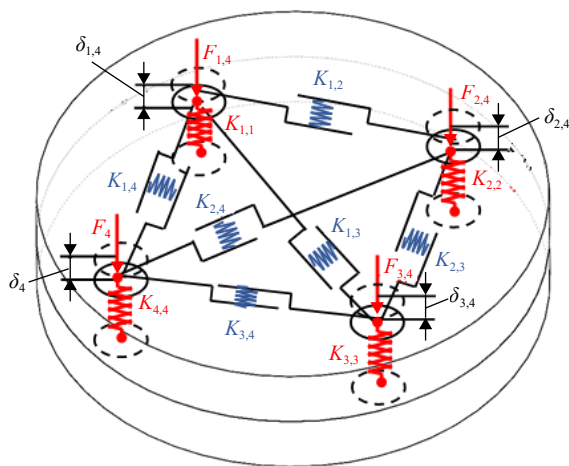


图 8 螺栓弹性相互作用示意图

Fig. 8 Schematic diagram of bolt elastic interaction

传统的研究方法主要是基于单轴拧紧时,通过优化拧紧顺序,拧紧步数等工艺参数,以降低弹性相互作用的影响^[26-28],但理论上规避螺栓弹性相互作用的最优方法为所有螺栓同步拧紧。然而,受限于当前的技术条件,这种方法尚未实现。但很多研究已逐步向多轴同步拧紧的方法发展,并结合优化的拧紧顺序,有效减小了螺栓预紧力的分散性^[29]。孙新^[30]针对航空发动机低压涡轮轴-盘鼓之间的螺栓拧紧,通过有限元仿真的方法研究了双轴同步拧紧结合对角拧紧顺序的工艺优化方法,相比单轴对角拧紧和单轴顺序拧紧的方法可以有效提高螺栓预紧力的一致性,如图 9 所示。

多轴拧紧方法应用的难点在于需要精确控制多轴的同步运动,为此李琦^[31]研究了多轴耦合同步的控制算法。瑞典工具制造商 ATLAS 为普惠公司 Trend 系列的发动机设计了双轴同步拧紧的自动化拧紧工具^[32],应用在风扇盘轴螺栓阵列拧紧中,如图 10 所示。两个拧紧轴的相位差为 180°,通过该拧紧工具,实现了双轴同步对角拧紧的工艺方法,提高了螺栓预紧力的一致性以及转子的

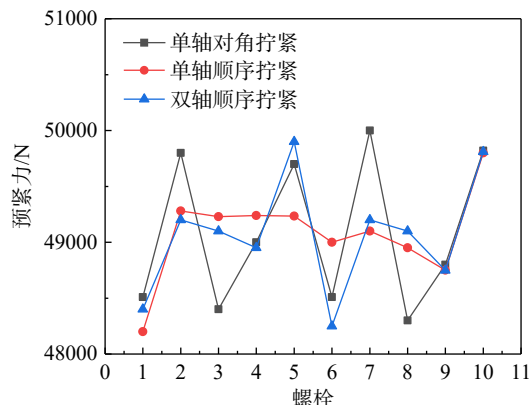


图 9 多轴拧紧仿真分析结果^[29]

Fig. 9 Multi-axis tightening simulation analysis results^[29]



图 10 多轴拧紧设备研究^[32]

Fig. 10 Research on multi-axis tightening equipment^[32]

装配效率。然而该拧紧设备的应用场景为开敞的转子空间,并不适用于转子盲腔螺栓拧紧。对于多步拧紧方法在盲腔空间中的应用,还需要依赖构型更加紧凑的拧紧机构。

3 盲腔螺栓拧紧装备

对盲腔螺栓拧紧装备的研究,是以精准高效的执行螺栓拧紧工艺为目标。一方面,在装备构型上需要突破盲腔狭小空间的限制,完成力矩传递,机构展开等操作,同时在操作过程中面向拧紧工艺需要满足结构强度和操作效率的需求;另一方面,在操作精度上需要具有足够的定位精度和拧紧精度,保证螺栓拧紧操作的准确执行。因此,从装备构型和精度控制两方面对盲腔螺栓拧紧装备进行总结。

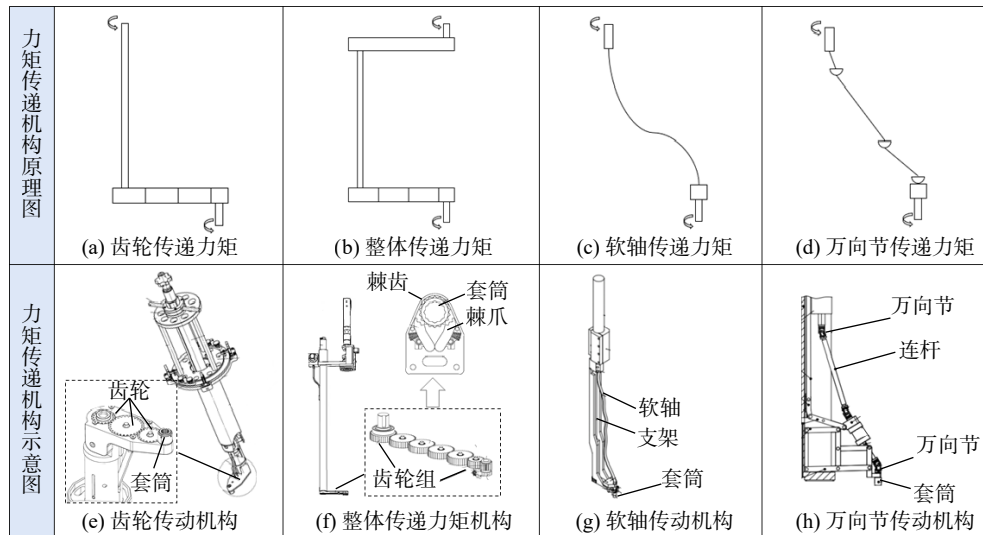
3.1 拧紧装备构型

3.1.1 力矩传递方式

当前,转子盲腔螺栓的拧紧机构有 4 种力矩传递方式,分别为齿轮传动、整体传动、软轴传动以及万向节传动(见图 11(a)~图 11(d))。其中,由于齿轮传动具有结构紧凑、传动平稳、承载能力大、传动效率高等优点,被广泛应用在盲腔螺

栓拧紧装备的执行机构中。基于齿轮传动结构传递力矩的原理为: 通过拧紧轴传递输入力矩到齿轮组, 再通过齿轮传动将力矩传递到拧紧套筒, 实现拧紧力矩的输出。拧紧套筒可看作一个特殊的齿轮, 即外部为齿轮形状, 与上述传动齿轮配合进行传递力矩, 而内部则为套筒结构, 与待拧紧螺母配合, 将螺母拧紧在螺栓上。比较典型的齿轮传动结构如图 11(e) 所示^[33], 这种齿轮传动结构适用于螺栓拧紧力矩较小的工况, 当螺栓拧紧力矩较大时, 齿轮结构由于刚度不足, 容易出现大力矩载荷下发生变形的情况, 导致力矩传递精度会受到影响。针对这种情况, 沈阳航空航天大学的叶长龙等^[34]设计了如图 11(f) 所示的结构。这种结构是在图 11(e) 所示原理的基础上, 在拧紧套筒外部增加一圈棘齿, 并在拧紧套筒两侧增加了棘爪结构, 通过控制棘爪结构与拧紧套筒配合, 可以齿轮组整体固定, 从而将拧紧臂与拧紧

轴等作为一个“C”形整体, 通过整体摆动的形式完成螺栓拧紧。整体式结构相对于齿轮结构具有更高的刚度, 因此更适用于目标力矩较大时的螺栓拧紧。这种方式的缺点是单次摆动的角度有限, 不能完成螺母的整圈转动, 需要多次摆动, 才能完成螺栓拧紧, 因此在拧紧效率上显著低于齿轮传动的方式。此外, 大连理工大学的孙清超等^[35-36]还设计了软轴传动和万向节传动的结构形式用于拧紧力矩的传递。这两种结构形式缩短了力矩传递链的总体长度, 并且将输入端的力矩直接通过软轴(图 11(g))或万向轮(图 11(h))传递到拧紧套筒, 因此降低了因力矩传递距离和齿轮传动过程中的摩擦等因素带来的力矩损失, 从而在一定程度上提高了力矩的传递精度。软轴结构柔性较好, 与万向节结构相比, 受盲腔空间限制较小, 然而在面向大力矩的螺栓拧紧时, 软轴传动仍然存在刚度不足的问题。

图 11 力矩传递方式^[33-36]Fig. 11 Torque transmission method^[33-36]

将当前盲腔螺栓拧紧不同力矩传递方式的优缺点总结如表 1 所示。

3.1.2 拧紧机构展开方式

由上文可知, 不同转子盲腔具有不同大小的

表 1 不同力矩传递方式比较

Table 1 Comparison of different torque transfer methods

力矩传递方式	优点	缺点	应用工况
齿轮传动	拧紧效率高	刚度不足	小力矩螺栓拧紧
整体摆动	结构刚度高	拧紧效率低	大力矩螺栓拧紧
软轴传动	传递精度高	刚度不足	小力矩螺栓拧紧
万向节传动	传递精度高	结构复杂	大力矩螺栓拧紧

盘径比, 由此对应着不同的展开结构形式。因此, 根据盲腔盘径比的大小, 对拧紧机构的展开方式进行总结。

对于小盘径比的转子盲腔, 常见的展开结构主要包括蜗轮蜗杆结构, 连杆结构, 滑轨结构等(见图 12(a)~图 12(c))。蜗轮蜗杆展开式结构具有传动平稳的特点, 可实现拧紧机构在盲腔中的稳定展开^[37]。为保证展开运动的精度, 需要提高对蜗轮蜗杆的加工精度要求。图 12(e) 为北京航空航天大学的李小强等^[38]研制的拧紧装备中蜗轮蜗杆展开结构, 其加工精度达到 6 级。连杆

式结构可以将拧紧臂和拧紧轴分离,在进入转子内腔时,拧紧臂与拧紧轴不垂直,此时可以减小拧紧臂的轴向分布长度,待拧紧臂运动至待拧螺栓所在平面时,通过连杆结构运动,将拧紧臂展开到与拧紧轴垂直状态,两者连为一体。这种展

开形式更适用于轴向入口小的转子盲腔空间,提高了拧紧机构的可达性,同时也增加了装配难度,如图 12(f)所示^[33]。滑轨结构具有运动精度高的优势,但是结构本身会占据一定的空间,对于盘间高度较小的盲腔结构无法适用,如图 12(g)所示^[39]。

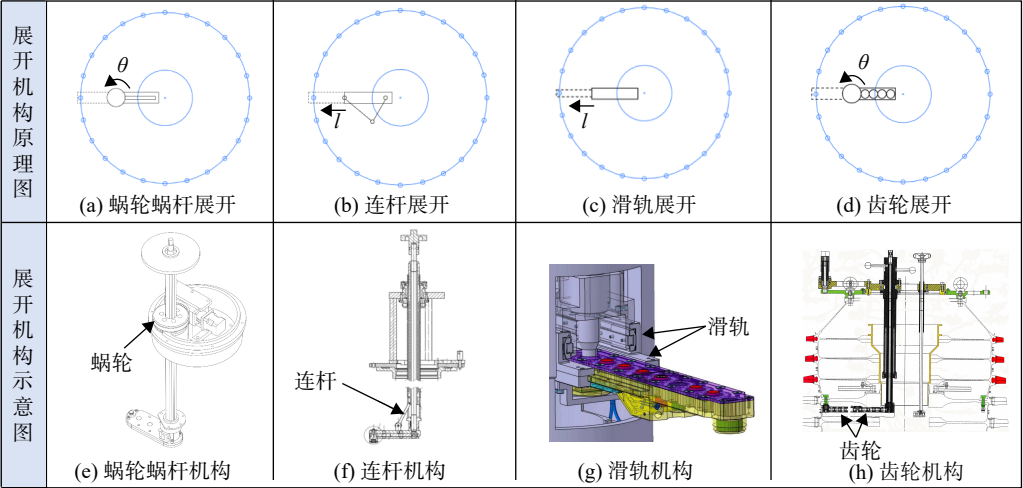


图 12 展开结构示意图^[33, 38-39]
Fig. 12 Unfolding structure diagram^[33, 38-39]

对于大盘径比的盲腔空间,由于拧紧机构需要进行两次展开才能到达待拧螺栓位置,在当前的设计中,往往基于齿轮传动结构,设计两段式末端拧紧机构,完成两次展开^[40-41]。如图 12(d)所示,上述展开方式的原理为两段拧紧机构连接处的齿轮为折叠中心,通过驱动齿轮传动,实现两段拧紧机构的展开与收缩。这种结构形式增大了拧紧机构的展开范围,从而满足了在大盘径比结构下拧紧机构到达待拧螺栓处的可达性。在此过程中需要精确控制齿轮的运动,使拧紧机构末端到达待拧螺栓位置。图 12(h)为意大利马波斯公司研制的基于齿轮传动展开的盲腔螺栓拧紧机构^[39]。

将上述拧紧机构展开方式的优缺点总结如表 2 所示。

表 2 不同拧紧机构展开方式比较			
Table 2 Comparison of deployment methods for different tightening mechanisms			
展开方式	优点	缺点	应用场景
蜗轮蜗杆结构	传动平稳	加工精度要求高	小盘径比盲腔结构
连杆结构	结构紧凑	装配困难	小盘径比盲腔结构
滑轨结构	运动精度高	占据空间较大	小盘径比盲腔结构
齿轮结构	可达性高	运动精度控制难度大	大盘径比盲腔结构

3.1.3 拧紧装备整体构型

盲腔螺栓拧紧装备的发展经历了 4 个阶段,最早使用特制的力矩扳手通过手动操作的方式拧紧螺栓。所用力矩扳手的构型设计比较简单,通过对普通力矩扳手进行改造,形成“L”形或“C”形的构型,适用于转子盲腔的空间。这种方式拧紧效率和拧紧精度很低,难以满足盲腔螺栓拧紧的需求。为代替手动拧紧,第 2 阶段以拧紧装备为导向,半自动化拧紧装备得到研究和应用。比较典型的装备有马波斯公司设计的拧紧装备^[39],在拧紧效率和拧紧精度上相比手动拧紧的方式有所提升。为进一步提升拧紧装备的自动化水平,第 3 阶段以自动化为导向,出现了拧紧全流程自动化拧紧装备的研究和应用。比较典型的有北京航空航天大学设计的自动化盲腔螺栓拧紧装备^[38]。第 2、3 阶段的拧紧装备均为传统的工装形式的整体构型,根据具体型号的转子盲腔结构尺寸设计的拧紧机构,并基于拧紧机构完成整套装备的搭建。该构型的缺点为结构形式较为复杂,并且灵活性、通用性较差,只适用于专一型号的航空发动机。

在当前工业 4.0 的发展趋势下,机器人技术获得了长足发展,使用工业机器人代替人工和传统的工装设备进行装配的技术已越来越成熟^[42]。第 4 阶段以通用性为导向,研究了基于机器人拧

紧的构型。这种构型只需要对拧紧机构进行设计, 然后通过机器人带动拧紧机构运动到待拧螺栓位置, 从而简化了拧紧装备的整体构型, 并且不受限于不同型号转子的尺寸, 提高了拧紧机构的灵活性和通用性。然而, 这种构型面临的挑战在于在盲腔狭小空间中拧紧臂的避障运动控制。在极限状态下, 拧紧臂与转子内壁距离仅为 $1\sim 2\text{ mm}$, 需要拧紧臂的运动进行精准控制, 由此对高自由度冗余机械臂路径规划, 动态工况下对实时避障响应速度, 以及拧紧过程对末端姿态精度和刚度控制都提出了很高要求。当前, 沈阳航空航天大

学^[43]、商发公司^[44], 以及德国的 MTU 公司^[45] 都有这样的方案设计, 但目前还主要处在探索阶段, 尚未得到广泛应用。未来可结合工业 4.0 时代的最新技术趋势, 包括数字孪生、人工智能等技术^[46], 在当前基于数字孪生和强化学习的自适应机器人运动轨迹规划方法^[47-48], 以及高精度机器人数字孪生定位系统^[49] 等研究的基础上, 针对盲腔工作环境对基于机器人拧紧的技术深入研究, 提高基于机器人拧紧的装备构型在转子盲腔中工作的可靠性。将转子盲腔螺栓拧紧装备的设计发展趋势如图 13 所示。

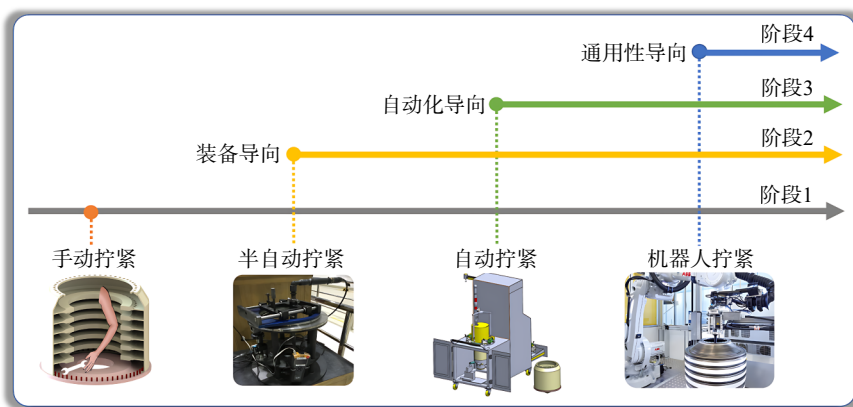


图 13 盲腔螺栓拧紧装备发展趋势

Fig. 13 Development trend of bolt tightening equipment for blind cavity

3.2 拧紧装备精度控制方法

3.2.1 盲腔螺栓定位方法

转子盲腔半封闭式结构特征导致无法直接观测拧紧机构末端与待拧螺栓的位置关系, 由此对拧紧机构造成了很大的定位难度。当前对定位方法的研究主要有两种: 一种是通过设计盲腔外部的参考基准, 建立盲腔内部的螺栓与盲腔外部基准的内外对应关系, 基于外部基准的定位, 实现拧紧机构在盲腔中对螺栓的定位。另一种是通过视觉识别的方式直接判断出盲腔中螺栓的位置, 从而实现拧紧机构对螺栓的定位。

基于内外对应关系的定位方式当前在很多拧紧装备中得到了应用。如图 14(a) 所示^[50], 拧紧机构安装在分度机构上, 分度机构固定在转子上部, 实现整个拧紧装备的定位。其中, 拧紧机构包括“C”型拧紧扳手和定位杆件部分, 分度机构的分度盘上具有与待拧螺栓位置相对应的通孔, 通孔上的编号为盲腔内部对应的螺栓编号, 如图 14(b) 所示。按拧紧顺序, 依次将定位杆件固定在分度盘的通孔上, 即对应着盲腔内部待拧螺栓的位

置。在拧紧机构的构型设计上, 应保证拧紧机构进入盲腔并固定后, 末端拧紧机构的套筒与螺栓同轴, 如图 14(c) 所示。这种定位方式原理简单, 应用较为广泛。主要依赖于分度机构和待拧螺栓的位置对应关系, 对于机构尺寸精度有严格要求。当尺寸偏差较大时, 容易出现套筒与螺栓不同轴的现象, 导致定位出现偏差, 并且由于盲腔结构的不可视性, 难以判断定位偏差的大小。

与内外对应的定位方式相比, 视觉识别的方式更为先进, 在结构上无需借助分度机构作为定位基准, 而是直接识别螺栓中心线, 引导拧紧机构进行定位。如图 15(a) 所示^[51], 在拧紧机构末端, 安装有摄像头和光源, 用于在盲腔黑暗环境中识别螺栓的中线。具体识别原理如图 15(b) 所示, 基于 Open CV 库, 对相机进行二次开发, 对采集的螺栓图片进行处理, 完成螺栓的轮廓提取、轮廓拟合、中心线提取等操作, 从而实现螺栓中线的识别。然后, 基于机器学习的方法, 使用 Pytorch(开源机器学习库) 进行模型训练, 计算螺栓中线位置与执行机构末端拧紧套筒的中线位置

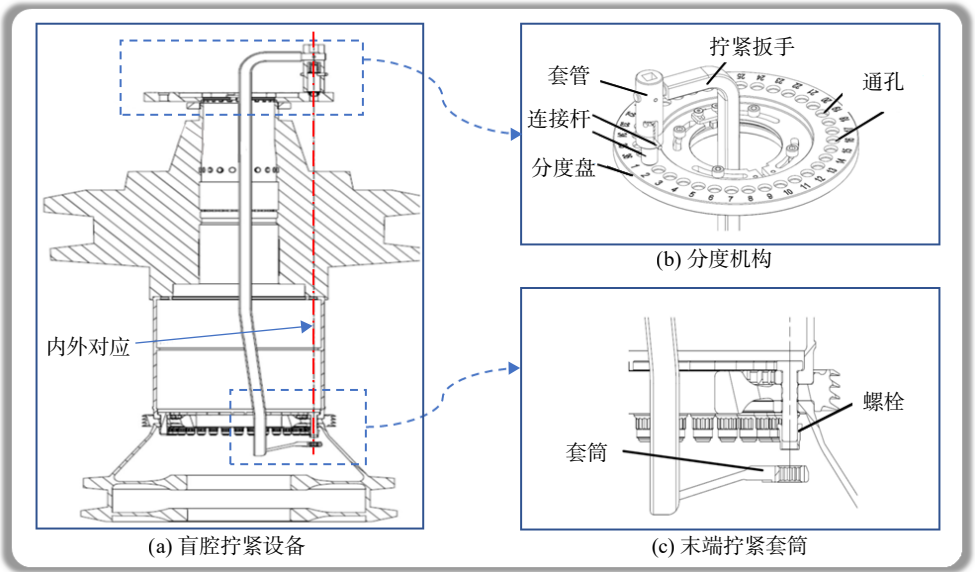


图 14 盲腔拧紧装备中的内外对应定位方式^[49]

Fig. 14 Internal and external corresponding positioning method in blind cavity tightening equipment^[49]

相差角度,如图 15(c)所示。反馈给上位机处理,进而控制装备转动直至拧紧套筒的中心线和螺栓的中心线满足角度精度(偏差在 $\pm 1^\circ$ 范围),实现首个螺栓的精确定位,如图 15(d)所示。在此基础上,建立极坐标系中剩余螺栓与首个螺栓的位置关系,以首个螺栓为基准,确认拧紧机构转动到剩余螺栓处的转角,如图 15(e)所示。通过控制拧紧机构的周向转动,完成剩余螺栓的定位。在此过程中,可通过安装角度传感器的方式,实现对拧紧机构转动的闭环控制,提高螺栓定位精度。这种定位方式依赖于摄像头、传感器等检测手段,

并涉及机器学习,软件开发等技术,设计难度较大,目前尚未得到广泛应用。但这种定位方式可以突破转子盲腔的不可视性,在定位效率和精度上具有更高的可靠性,在未来具有很大的应用前景。

3.2.2 拧紧精度控制方法

在螺栓拧紧过程中,经过长距离传递,力矩和转角产生了多源误差,具体包括:拧紧工具输入力矩和转角时产生的误差,拧紧机构自身的加工误差,拧紧机构装配产生的误差,在高温环境下拧紧机构产生的变形误差,在力矩载荷作用下拧

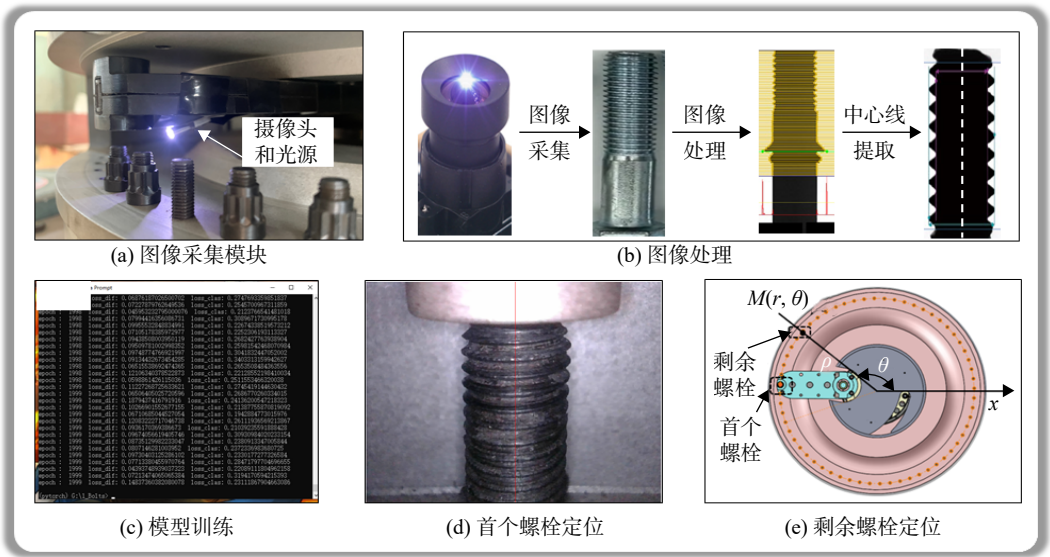


图 15 视觉识别定位方式^[51]

Fig. 15 Visual recognition positioning method^[51]

紧机构产生的变形误差, 拧紧机构在传递力矩和转角过程中由于摩擦影响产生的误差, 以及长时间进行拧紧产生的磨损引发的误差。以齿轮传动形式的误差传递为例, 许立新等^[52]针对减速器的动态传动精度问题开展了理论分析和试验研究, 结合加工误差、装配误差等多源误差的影响, 并考虑了负载的耦合作用, 发现在额定扭矩下最大传动误差比空载条件下增加了 58.9%。赵琳娜等^[53]则是通过建立基于瑞利分布的传动误差多因素耦合模型, 并开展试验验证, 得到了计算出各传动误差源的权重系数, 从而量化了各误差因素对最终精度的影响。

为了补偿多源误差给拧紧精度带来的影响, 当前常用的方法为校准法, 如图 16 所示。首先在输入端通过先进的拧紧工具保证力矩/转角的高精度输入。当前, 常用的高精度拧紧工具的力矩控制精度可达 $\pm 2\%$, 转角控制精度可达 $\pm 1\%$ ^[54]。其次, 在输出端也需要使用高精度的测量设备, 当前, 高精度传感器的力矩精度可达 $\pm 0.3\%$, 转角精度可达 $\pm 1\%$ ^[55]。由于盲腔空间的体积限制, 测量设

备无法直接安装在盲腔内部。因此, 需要设计开敞环境下的校准工装, 保持拧紧机构末端的拧紧位置与盲腔中实际拧紧螺栓位置一致, 从而模拟真实的螺栓拧紧过程, 测量得到出力矩/转角大小。最后, 基于大量的试验数据得到力矩/转角的输入-输出关系, 从而获得多源误差对输出精度的影响规律。已知目标的出力矩/转角, 根据输入-输出关系调整输入的力矩/转角值, 即可完成对多源误差影响的补偿, 从而保证力矩/转角的输出精度。

校准法没有突破在盲腔中对拧紧力矩/转角的实时在线测量, 本质上进行的是拧紧精度的开环控制。当拧紧机构完成长时间的螺栓拧紧后, 多源累积误差的对输出结果的影响规律会发生变化, 导致校准效果存在波动。为提高校准法的准确性, 需要在每拧紧完成一次转子盲腔螺栓阵列时, 重新对拧紧机构进行校准。

因此, 应进一步研究拧紧精度的闭环控制方法, 如图 17 所示。这种方法不需要在拧紧前对拧紧机构进行校准, 而是基于实时测量结果在输入端进行调整, 动态补偿多源误差造成的精度损失,

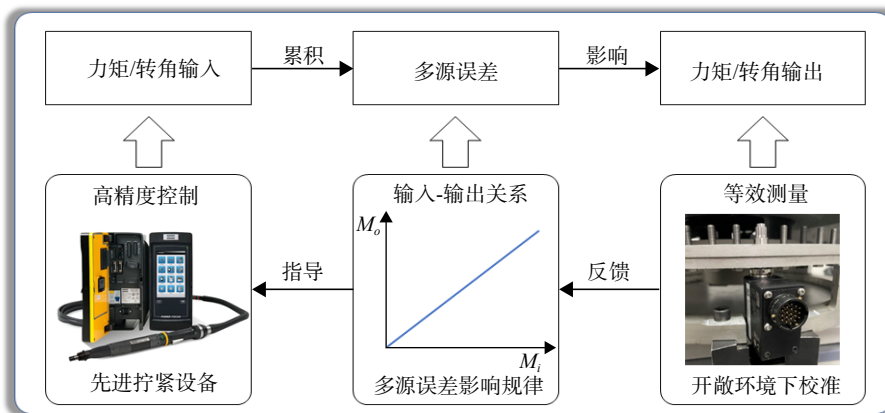


图 16 校准法示意图

Fig. 16 Schematic diagram of calibration method

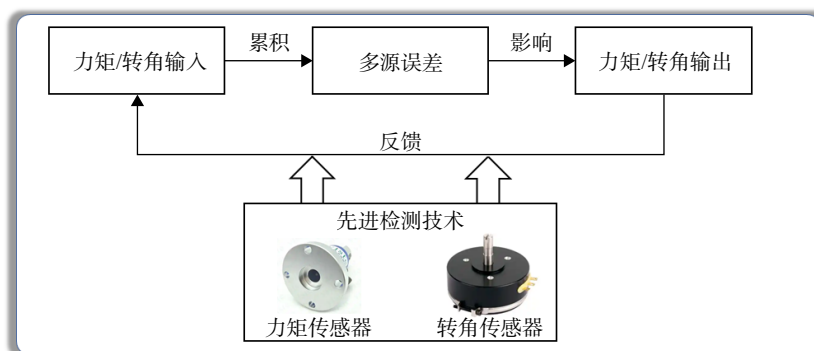


图 17 闭环控制方法示意图

Fig. 17 Schematic diagram of closed loop control method

从而有效提高对力矩/转角的精度控制。然而,该方法依赖于先进的拧紧检测技术(在下文详细论述),目前并没有得到落地应用。

4 螺栓拧紧检测技术

螺栓拧紧过程需要控制拧紧力矩和转角,螺栓拧紧质量主要以螺栓预紧力为判断依据。因此,面向这 3 个参数,对螺栓拧紧检测技术进行总结。

4.1 拧紧力矩和转角的检测

螺栓拧紧过程本质上可以看作对一根轴施加力矩的过程,根据材料理论,在此过程中,会发生

扭转变形,从而产生最大切应力(或应变)和转角两个物理量。对力矩的测量方法为通过测量上述两个物理量之一,根据相关的力学公式,即可得到对应的力矩。因此,力矩测量方法可以分为应变式测量法和转角式测量法^[56]。应变式测量法是根据力矩和应变的关系,通过测量螺栓的应变计算得到螺栓拧紧力矩,转角式测量法是根据力矩和转角的关系,通过测量螺栓的转角计算得到螺栓拧紧力矩。

将上述两种力矩检测方法的具体分类总结如表 3 所示。

表 3 力矩检测方法总结
Table 3 Summary of torque measurement methods

力矩检测方法	具体分类	测量原理	信号传递方式
应变式	碳刷式力矩传感器	应变电桥电阻转化为电压信号	接触式
	电磁感应式力矩传感器	线圈电磁感应转化为电信号	非接触式
	无线传输式力矩传感器	无线信号发射接收单元实现信号传递	非接触式
转角式	电磁式传感器	线圈电磁感应转化为电信号	非接触式
	光电测量原理	光敏元件感应电信号	非接触式

在上述力矩检测方法中,与非接触式传感器相比,接触式传感器存在如下弊端:

1) 在长时间工作的可靠性上,由于接触式传感器中的滑环与待测的转轴接触,在长时间工作后由于摩擦作用易发生发热老化的现象,严重时甚至会出现断裂,因此在可靠性方面并不适合盲腔螺栓拧紧中力矩检测的工况。

2) 在测量精度方面,由于接触式力矩传感器需要安装在转轴上,其自身的转动惯量对于力矩测量的精度具有一定影响,而非接触式传感器无需对转轴提供附加力的作用,可以提高测量的准确性。

因此,在测量的可靠性和精度方面,非接触式力矩传感器更适用于盲腔螺栓拧紧中的力矩检测。当前非接触式力矩传感器的常规结构形式主要包括法兰式结构,轴式不带底座结构,轴式带底座结构。将其安装在拧紧执行机构末端或者螺栓上,难度很大,目前还没有研究突破盲腔结构的限制。因此,针对盲腔结构狭小空间的难点,

应该在力矩传感器的构型方面向小型化的方向研究。同时传感器体积的缩小会带来性能的下降,因此,还需要在小型传感器的基础上进一步提升测量精度,满足力矩传感器在盲腔螺栓拧紧大力矩的测量需求。

在当前非接触式传感器的研究中,主要有两种研究方向:增加无线信号传输模块和使用特殊力矩敏感材料^[57],将其总结如表 4 所示。其中,增加无线信号传输模块是在传统的接触式测量方案基础上进行的技术升级,具有较高的成熟度,然而在传感器体积方面尚未改进。基于特殊力矩敏感材料的方法,是基于材料物理特性制成的新型力矩测量装置,将感应得到的力矩变化量转变为多物理场(例如:磁场、光、电场)的变化量,并最终转换为电学量。当前可应用的材料包括光弹性材料和压电材料等。该方法可以减小传感器的体积,并提高测量精度和响应速度,但目前还处在研究阶段,尚未得到实际应用。

对于螺栓拧紧转角的检测,除了上述通过接

表 4 非接触式力矩传感器的主要研究方向
Table 4 Main research directions of non-contact torque sensors

研究方向	特点	测量精度	响应速度	传感器体积	成熟度
无线信号传输模块	利用物理场穿透性传递信号	较高	较快	大	成熟
特殊力矩敏感材料	利用材料物理特性传递信号	高	快	较小	不成熟

触式和非接触式的传感器测量转角信息外,当前还有两种先进的检测方法:

1) 基于图像视觉的螺栓转角检测方法

近年来,随着计算机视觉技术的快速发展,在转角检测的研究中也得到了广泛应用。吕明达基于数字图像处理技术和深度学习技术,建立了螺栓转角的测量方法,如图 18 所示^[58]。通过图像透视矫正的方法,采集螺栓图像,基于轮廓矢量链码

和高斯滤波,并对图像进行灰阶化预处理,得到螺栓图像。进一步对图像进行二值化处理,以及边线拟合,得到螺栓的具体轮廓,最后基于螺栓转角的换算关系,计算得到螺栓的转角大小,并与实测结果进行对比,验证了当前方法的有效性。这种方法可以突破传统传感器检测的体积限制,然而,图像效果容易受到光线亮度、设备振动等环境因素的影响,尚未应用在盲腔螺栓拧紧过程中。

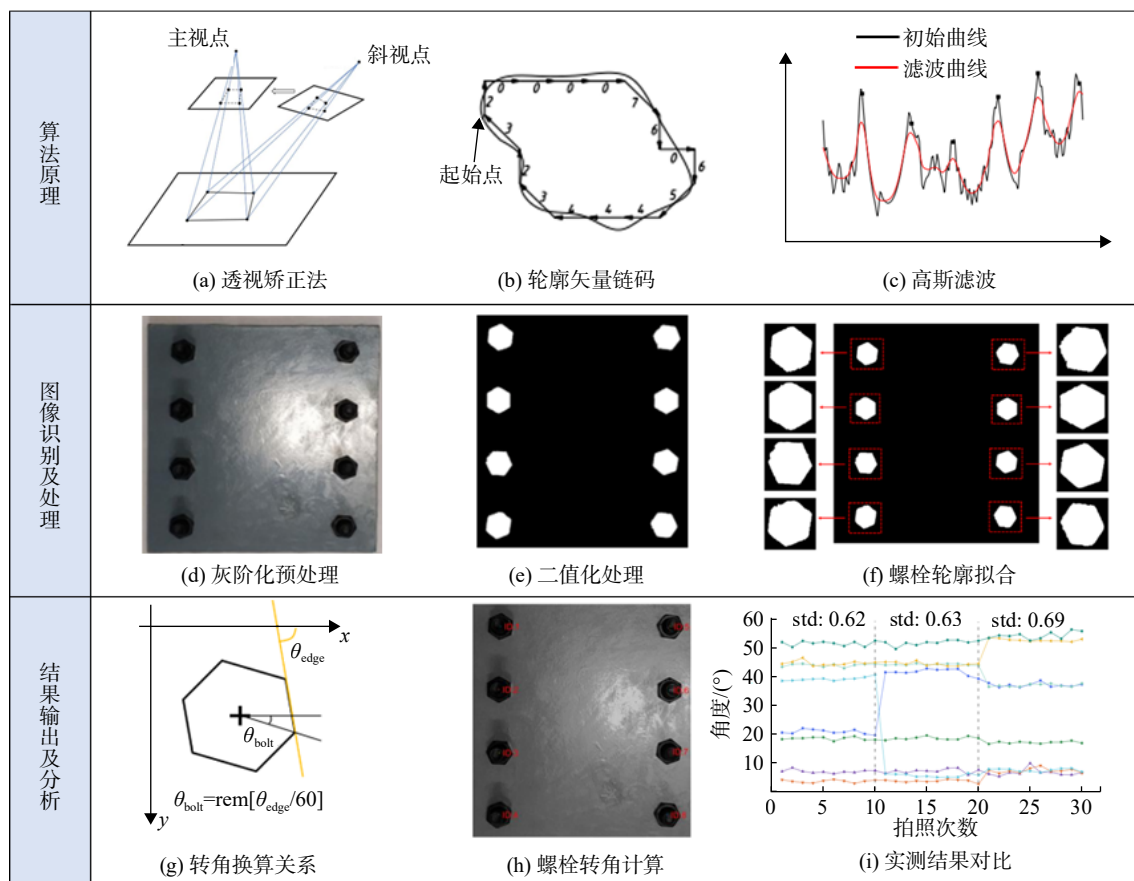


图 18 基于图像视觉的转角检测方法^[58]

Fig. 18 Angle measurement method based on image vision^[58]

2) 基于射频识别技术的螺栓转角检测方法

射频识别(Radio frequency identification, RFID)传感技术是近年来兴起的一项新型传感技术,通过将 RFID 标签放置在螺栓或螺母上,利用射频信号空间的电磁或电感耦合来识别跟踪特定目标并读写相关数据,实现对螺栓拧紧转角的非接触式自动识别^[59]。

基于上述 RFID 技术原理, Wu 等^[60]提出了一种基于 RFID 技术的螺栓松动监测系统,如图 19 所示,该系统由螺栓传动系统、无源超高频 RFID 标签、金属薄膜、读取器和监测软件组成,其中锡

箔金属薄膜、RFID 标签分别固定在螺栓传动系统的固定板和大齿轮上,而被监测螺栓固定在传动系统的小齿轮的中心,当螺栓转动时,小齿轮旋转带动大齿轮转动,进而触发嵌入式天线,向 RFID 读取器发送射频信号,并显示在监控软件界面上。由于基于 RFID 的螺栓连接状态监测技术需要将 RFID 标签采用一定的方式固定到待测螺栓上,受螺栓大小、安装尺寸及 RFID 尺寸的限制,该方法在螺栓连接状态监测领域的现有研究较少,要实现在盲腔螺栓拧紧中的转角检测,还需要进一步的研究。

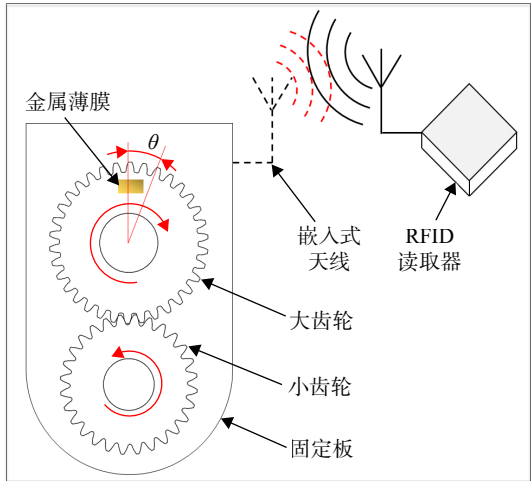


图 19 基于射频识别技术的转角检测方法^[60]

Fig. 19 Angle measurement method based on radio frequency identification technology^[60]

4.2 螺栓预紧力的检测

当前,螺栓预紧力先进的测量方法主要包括超声测量法,压电主动式测量法,电阻应变测量法,以及光纤光栅测量法等,如表 5 所示。其中,超声测量法基于声弹性效应,通过采集超声波沿螺栓轴向传播的时差,推算螺栓预紧力的大小^[61-62]。压电主动式测量法基于压电效应,通过压电片感知入射能量和接收能量,反馈螺栓预紧力的大小^[63-64]。电阻应变测量法基于应变-电阻效应,通过对电阻应变片的阻值进行测量进而实现对螺栓预紧力的检测^[65]。光纤光栅测量法基于光纤光栅布拉格效应,通过 FBG(光纤布拉格光栅)传感器对光纤光栅中心波长的偏移量进行检测得到螺栓内部的应力变化,从而计算出螺栓预紧力^[66-67]。

然而,针对航空发动机盲腔螺栓连接结构的特征,应用上述检测方法进行螺栓预紧力的检测受到了如下限制:

1) MEMS(微机电系统)传感器具有体积小、集成度高等优势,已在多种高温高振动环境中展现出良好的适应性。然而, MEMS 传感器在抗电磁干扰和远距离无损信号传输方面存在一定局限。相比之下, FBG 传感器具备极强的电磁抗扰

性和高精度多点复用能力,能够实现温度、应变、力等多种参量的分布式测量,但其布设过程较为复杂,对封装工艺与光路稳定性要求较高^[68]。在螺栓内部嵌入 MEMS 传感器或 FBG 传感器,会破坏螺栓结构的完整性,影响螺栓的强度。当前有学者提出了基于嵌入式传感器的“智能螺栓”的概念^[69],用于监测螺栓松动以及测量螺栓预紧力等^[70-71],但目前尚未在航空发动机装配领域得到落地应用。

2) 由于盲腔螺栓拧紧存在高温环境的阶段,超声测量法、压电主动式测量法和电阻应变测量法会受到高温环境的干扰,从而降低了测量精度^[72],因此,为保证测量精度,这两种方法更适用于在常温环境下进行测量。

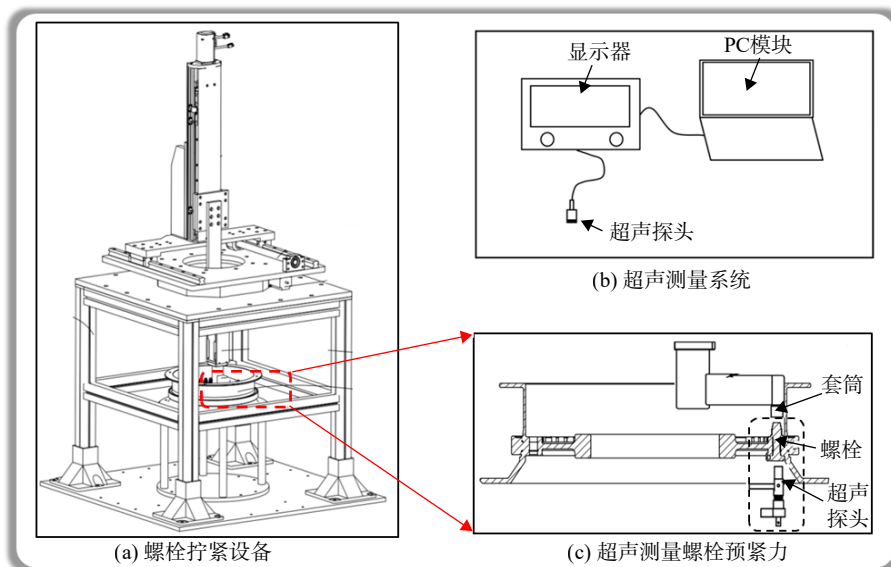
3) 在螺栓表面或被连接件表面安装传感器等元器件,虽然不会破坏螺栓结构,但螺栓拧紧完成后,安装的元器件则成了转子内部的多余物,因此需要将其拆除,由于受到盲腔狭窄空间的影响,拆除过程的操作将非常困难;此外,如涉及到超声波发射接收器或 FBG 传感器的连线操作,在盲腔中也同样受到狭小空间的影响。

综上所述,上述测量方法在盲腔螺栓拧紧中的应用还处在探索阶段,尚未突破盲腔结构的限制。例如,大连理工大学的孙清超等^[73],基于开敞空间的转子模拟件进行螺栓预紧力的测量,证明了超声测量法对螺栓预紧力测量的有效性,并提出了基于预紧力反馈的螺栓拧紧控制方法,如图 20 所示。然而,由于模拟件并未体现转子盲腔结构狭小空间特征,并不能直接应用在盲腔螺栓拧紧的预紧力测量中。因此,在未来的研究中,可以基于当前的螺栓预紧力测量方法,设计相应的辅助工装,突破盲腔空间对传感器等元器件的安装、拆除和连线操作的限制,实现螺栓预紧力的在线测量。在未来的研究中,可考虑发展 MEMS 与 FBG 融合的微型化传感器系统,利用 MEMS 器件实现本地信号转换与预处理,再通过 FBG 传感器进行高精度、多点的数据传输与感知,从而

表 5 螺栓预紧力先进检测方法总结

Table 5 Summary of advanced measurement methods for bolt preload

测量方法	测量原理	应用条件
超声测量	声弹性效应	在螺栓上安装超声波发射接收器
压电主动式测量	压电效应	在被连接件表面安装压电片
电阻应变测量	应变-电阻效应	在螺栓内部安装 MEMS 传感器或螺栓表面安装电阻应变片
光纤光栅测量	光纤光栅布拉格效应	在螺栓内部、螺栓表面或垫片内部安装 FBG 传感器

图 20 超声测量法的应用^[70]Fig. 20 Application of ultrasonic measurement method^[70]

兼顾系统的嵌入性、抗干扰性与智能化水平。通过系统级协同设计与多物理场耦合优化,该类融合传感器有望突破现有检测技术在盲腔应用中的体积与性能瓶颈,推动航空发动机螺栓拧紧检测向“无多余物”高集成智能监测方向演进。

5 总结与展望

5.1 总 结

本文分析了航空发动机转子盲腔螺栓拧紧的技术需求,围绕盲腔螺栓拧紧工艺、盲腔螺栓拧紧设备以及螺栓拧紧检测技术等方面,总结了盲腔螺栓拧紧技术的研究现状:

1) 当前,国内外学者在转子的止口配合阶段和螺栓拧紧阶段分别进行了工艺优化研究,提出了压装法、力矩转角法以及多轴拧紧等工艺方法。然而,由于盲腔空间的限制,拧紧工艺的研究与执行装备和检测技术密不可分,执行和检测方面的突破是拧紧工艺研究形成闭环的重要保证。力矩转角法,多轴拧紧方法正是受限于这两个方面,目前还没有在转子盲腔中得到实际的应用验证。

2) 盲腔螺栓拧紧装备的整体构型经历了从传统的工装式拧紧装备到基于机器人拧紧的装备发展,自动化、智能化程度显著提高。面向盲腔狭小空间,机器人末端执行机构的力矩传递结构和展开结构的设计已比较成熟。然而,在复杂狭小的盲腔空间中,拧紧装备的执行机构不仅要避免与转子内壁发生碰撞,还需解决多自由度运动带来的控制复杂性,由此需要对运动精度进行进

一步的研究。

3) 对盲腔螺栓拧紧的检测,当前主要从拧紧力矩、转角以及螺栓预紧力的检测技术展开研究。非接触式力矩传感器的测量可靠性和精度更高,但受限于盲腔狭小空间,未能应用在盲腔螺栓拧紧测量中;基于图像视觉的转角检测方法,突破了空间尺寸限制,但测量精度仍受到光线环境影响,还需进一步研究;超声测量预紧力的方法已在开敞空间的转子螺栓连接中得到应用,但其使用条件目前未能突破盲腔空间的限制。

5.2 展 望

基于当前盲腔螺栓拧紧技术的研究现状,提出如下研究展望:

1) 压装-拧紧-测量一体化设备的研究。将当前相互独立的压装、拧紧以及测量设备集成到一个系统中,从而将这3个工序整合为连续闭环的转子装配流程。例如,基于工装式构型,通过电动机驱动止口压装和螺栓拧紧,可以实现压装-拧紧的集成。再将非接触式测量等先进测量设备集成到压装-拧紧设备中,从而实现一体化的目标。同时,可以进一步将螺栓拧紧质量的评价指标提升到航空工业标准的层面,包括螺栓拧紧力矩、预紧力的离散度等指标,根据实测数据进行拧紧工艺与航空行业标准的符合性验证,并进行迭代优化,预测最优的压装-拧紧工艺参数组合,从而提升转子装配质量。

2) 机器人构型的拧紧装备优化研究。对轻质高强度材料进行深入研究,以替代当前拧紧机

构中的齿轮材料等,从而提高在长期高负荷工况下末端拧紧机构的强度和稳定性;设计机器人末端执行快换机构,满足多种发动机型号的转子盲腔螺栓拧紧的需求,提高装备的通用性;采用滑模控制和自适应控制等先进控制算法,适应不同的拧紧任务需求,实时调整力控制和位置控制的权重,确保装配机器人在复杂工作环境中的高精度作业;结合遗传算法等全局优化算法对运动路径进行优化,提高机器人运动的效率和稳定性。

3) 视-触多模态融合的在线测量技术研究。通过对不同位置和不同类型的传感器数据进行多源融合,根据卡尔曼滤波或贝叶斯估计的多传感器数据融合方法,进行数据的加权处理,动态调整融合权重,构建自感知状态监测模型,实现对螺栓拧紧状态的实时监测。研究 MEMS 与 FBG 融合的微型化传感器系统,以减小空间尺寸,突破盲腔狭小空间的限制。优化超声预紧力测量设备,设计相应的辅助工装,以简化在盲腔中的应用条件,完成螺栓预紧力的在线测量。

参考文献:

- [1] 洪杰, 马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构与设[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Hong Jie, Ma Yanhong. Structure and design of aircraft gas turbine engine[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [2] 赵广, 王永泉, 赵向阳, 等. 盘鼓螺栓连接结构接触刚度建模与应用检验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 76-86.
Zhao Guang, Wang Yongquan, Zhao Xiangyang, et al. Modeling and application test of contact stiffness of bolt connection structure of disk and drum[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 76-86. (in Chinese)
- [3] 李伦绪, 陈果, 于平超, 等. 止口螺栓连接结构非线性刚度机理分析及数值仿真[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 358-368.
Li Lunxu, Chen Guo, Yu Pingchao, et al. Nonlinear stiffness mechanism analysis and numerical simulation of rabbet-bolted connection structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 358-368. (in Chinese)
- [4] 王开平, 闫明, 孙自强, 等. 不同载荷下螺栓法兰连接结构非线性刚度影响因素[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2503-2514.
Wang Kaiping, Yan Ming, Sun Ziqiang, et al. Influence factors of nonlinear stiffness of bolted flange connection structure under different loads[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12): 2503-2514. (in Chinese)
- [5] 洪杰, 徐翥如, 苏志敏, 等. 高速转子连接结构刚度损失及振动特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 18-25.
Hong Jie, Xu Xiru, Su Zhimin, et al. Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 18-25. (in Chinese)
- [6] Sun Wei, Li Tao, Yang Dongjian, et al. Dynamic investigation of aeroengine high pressure rotor system considering assembly characteristics of bolted joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 112: 104510.
- [7] 张渝, 李琳, 陈津, 等. 航空发动机重要装配工艺分析及研展望[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 14-21.
Zhang Yu, Li Lin, Chen Jin, et al. Research current status and prospect on aero-engine assembly process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 14-21. (in Chinese)
- [8] 洪志亮, 李煜, 何文博, 等. 热载荷下螺栓预紧力对非连续转子界面滑移特性影响[J]. 航空学报, 2024, 45(24): 230402.
Hong Zhiliang, Li Yu, He Wenbo, et al. Influence of bolt preload on slip characteristics at discontinuous rotor interfaces under thermal load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(24): 230402. (in Chinese)
- [9] 郭钢毅. 航发转子螺栓-止口连接界面均匀性分析及工艺调控研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Guo Gangyi. Analysis of uniformity and process control of bolt rabbet connection interface in aero engine rotors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [10] Wang Xingyuan, Lou Zhifeng, Wang Xiaodong, et al. Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(8): 2834-2846.
- [11] 梁利华, 谢聃, 蒋立正. 管件过盈装配仿真与实验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(4): 355-358.
Liang Lihua, Xie Dan, Jiang Lizheng. Simulation and experimental study on interference fit of tube[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(4): 355-358. (in Chinese)
- [12] 李泽林. 基于轴向预载的转子装配方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Li Zelin. Research on rotor assembly method based on axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 李小冬. 航空发动机转子止口—螺栓装配工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Li Xiaodong. Research on assembly process of aeroengine rotor rabbet-bolt joint structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] Papastathis T, Ryll M, Bone S, et al. Development of a reconfigurable fixture for the automated assembly and disassembly of high pressure rotors for rolls-Royce aero engines[C]//Precision Assembly Technologies and Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 283-289.
- [15] 王涛, 宋扬, 唐雅伶, 等. 一种转子双环压紧装配设备及方法: CN201410513724.6[P]. 2015-03-25.
- [16] Duffey T A. Optimal bolt preload for dynamic loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1993, 35(3/4): 257-265.
- [17] Bickford J H, Oliver M. Introduction to the design and behavior of bolted joints[M]. 5th Ed. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [18] Sharma S, Chapman I. Choosing the optimum fastening system: Selecting the best tightening system for a bolted joint requires close attention to the factors that contribute to the overall quality and durability of the final assembly[J]. Bosque, 2013, 34(3): 291-302
- [19] 李九一, 周丰峻, 张庆, 等. 螺纹结构精确有限元建模及有效性分析[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 220-229.
Li Jiuyi, Zhou Fengjun, Zhang Ao, et al. Accurate finite element modeling and validity analysis of thread structure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(3): 220-229. (in Chinese)

- [20] 朱正德, 林湖. 基于螺栓装配技术中扭矩法与扭矩/转角法比较与应用研究[J]. *柴油机设计与制造*, 2005, 11(2): 40-43.
Zhu Zhengde, Lin Hu. Comparison and application research based on torque method and torque/rotation angle method in bolt assembly technology[J]. *Design and Manufacture of Diesel Engine*, 2005, 11(2): 40-43. (in Chinese)
- [21] 李小强, 孟庆阔, 杜一凡, 等. 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(13): 231-241.
Li Xiaoqiang, Meng Qingkuo, Du Yifan, et al. Influence of tightening strategy on pre-tightening force of aero-engine single-bolt connection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 231-241. (in Chinese)
- [22] 陈津, 刘增辉, 周烁, 等. 自适应贴合力矩的扭矩转角法拧紧工艺分析[J]. *机械设计与制造*, 2024(10): 43-47, 52.
Chen Jin, Liu Zenghui, Zhou Shuo, et al. Tightening technology analysis of torque-angle method with adaptive sung torque[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(10): 43-47, 52. (in Chinese)
- [23] 张博超. 航发低压涡轮轴盘连接预紧力精确控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Zhang Bochao. Research on precise control of pre-tightening force of axle-disk connection of aeronautical low-pressure turbine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [24] 孙贵青, 赵哲, 杨法立, 等. 某发动机盘轴“力矩-转角”连接法应用试验[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(9): 76-79+93.
Sun Guiqing, Zhao Zhe, Yang Fali, et al. Application test of torque-angle connection method for a certain engine shaft[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2019, 62(9): 76-79, 93. (in Chinese)
- [25] Bibel G D, Ezell R M. An improved flange bolt-up procedure using experimentally determined elastic interaction coefficients[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1992, 114(4): 439-443.
- [26] Abasolo M, Aguirrebeitia J, Avilés R, et al. Methodology for the optimization of bolting sequences for wind generator flanges[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2014, 136(6): 061202.
- [27] Zhu Linbo, Bouzid A H, Hong Jun. Analytical evaluation of elastic interaction in bolted flange joints[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 165: 176-184.
- [28] Hou B, Sun Y, Zhang W. The properties of bolted joint assembly with contact stiffness[J]. *International Journal of Smart Engineering*, 2018, 2(3): 325-342.
- [29] Yu Dongmei, Guo Qingding, Hu Qing. Synchronized control of dual linear motors position servo system based on fuzzy self-learning compensation[C]//First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I. Piscataway, US: IEEE, 2006: 454-458.
- [30] 孙新. 低压涡轮轴盘螺栓组预紧力分布机理及其模态特性[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Sun Xin. The distribution mechanism on preload of bolt group and modal characteristics of low pressure turbine shaft and disc[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [31] 李琦. 多轴螺纹同步拧紧控制系统研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
Li Qi. Research on multi-axis thread tightening control system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [32] 孙泽宇. 基于预紧力反馈的航发转子螺栓自动拧紧系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
Sun Zeyu. Research on automatic tightening system of aeroengine rotor based on preload feedback[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [33] 李琳, 张渝, 周烁, 等. 一种螺母安放拧紧装置、方法及系统: CN201410512757.9[P]. 2017-05-17.
- [34] 叶长龙, 贾容典, 余雪, 等. 一种航空装备螺母专用拧紧设备: CN 114986137 A [P]. 2022-09-02.
- [35] 孙清超, 杨阳, 袁博, 等. 一种航空发动机内部螺母软轴传动式拧紧装置及方法: CN201910827563.0[P]. 2019-12-13.
- [36] 孙清超, 袁博, 杨阳, 等. 一种航空发动机内部螺母万向节传动式拧紧装置及方法: CN201910828095.9[P]. 2019-11-26.
- [37] 叶长龙, 贾容典, 余雪, 等. 一种航空装备螺母全自动安装设备: CN202211661097.1[P]. 2023-05-16.
- [38] 李小强, 韩玉杰, 张永生. 一种航空发动机压气机转子盲腔螺母自动拧紧装置及方法: CN202011458586.8[P]. 2021-04-02.
- [39] Marposs. Aerospace industry-MRO, and equipment- Marposs[EB/OL]. (2014-07-01) [2025-04-07] <https://www.marposs.com/chi/application/aerospace-industry-mro-and-tooling>.
- [40] 李小强, 张宗江, 李峥, 等. 一种面向大盘径比压气机盘间螺栓拧紧装置及方法: CN202310378689.0[P]. 2023-06-30.
- [41] 陈栋权, 汪俊熙, 李琳, 等. 螺母拧紧装置: CN108237393B[P]. 2019-08-27.
CHEN Dongquan, WANG Junxi, LI Lin, etc Nut tightening device: CN108237393B[P]. 2019-08-27. (in Chinese)
- [42] Ahmad Malik A. Digital twin based development of mobile robot assistant in wind turbines manufacturing[C]//ASME 2023 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, New York, US: ASME, 2023, 87295: V002T02A014.
- [43] 魏企业. 航空发动机螺栓自动拧紧机结构与控制系统设计[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
Wei Qiye. Design of structure and control system for automatic tightening machine of aeroengine bolts[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018. (in Chinese)
- [44] 连宇臣, 陈津, 陈勤, 等. 航空发动机高压涡轮后轴螺母的拧紧装置及拧紧方法: CN201810681084.8[P]. 2021-08-17.
- [45] MTU Aeroreport. How robots help screw together compressor rotors[EB/OL]. (2014-07-01) [2025-04-05]. <https://aeroreport.de/en/innovation/how-robots-help-screw-together-compressor-rotors>.
- [46] Guerra-Zubiaga D A, Colani M, Richards G, et al. A novel digital twin model to support intelligent robotic manufacturing system according to industry 4.0 trends[C]//ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, US: ASME, 2024, 88605: V002T03A077.
- [47] Zhou Qi, Wu Jin, Li Boyan, et al. Adaptive robot motion planning for smart manufacturing based on digital twin and Bayesian optimization-enhanced reinforcement learning[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2025, 147(5): 051009.
- [48] Alham R, Hammadi M. Developing a digital twin framework for monitoring the trajectory of the UR10 robot using an extended Kalman filter[C]//2023 6th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering. Piscataway, US: IEEE, 2023: 86-91.
- [49] Ren Junru, Nalpantidis L, Andersen N A, et al. Building digital twin of mobile robotics testbed using centralized localization system[C]//2023 11th International Conference on Control, Mechatronics and Automation. Piscataway, US: IEEE, 2023: 139-145.
- [50] 王海晨, 欧阳醒, 范明争. 拧紧装置: CN117655967A[P]. 2024-03-08.
- [51] 张宗江, 李小强, 韩玉杰, 等. 航空发动机盲腔螺母精密拧紧技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2026, 52(1): 260-274.

- Zhang Zongjiang, Li Xiaoqiang, Han Yujie, et al. Precision tightening technology for aeroengine blind cavity nuts[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2026, 52(1): 260-274. (in Chinese)
- [52] 许立新, 夏晨, 杨博. 负载条件下 RV 减速器动态传动误差分析与试验[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(18): 2143-2152.
Xu Lixin, Xia Chen, Yang Bo. Analysis and test on dynamic transmission errors of RV reducers under load conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(18): 2143-2152. (in Chinese)
- [53] 赵琳娜, 汪龙, 方金, 等. 一种基于多因素耦合的谐波减速器传动精度逆向分析方法[J]. *机械传动*, 2021, 45(3): 19-24.
Zhao Linna, Wang Long, Fang Jin, et al. An inverse analysis method of transmission accuracy of harmonic reducer based on multi-factor coupling[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(3): 19-24. (in Chinese)
- [54] 赵罡, 李瑾岳, 徐茂程, 等. 航空发动机关键装配技术综述与展望[J]. *航空学报*, 2022, 43(10): 527484.
Zhao Gang, Li Jinyue, Xu Maocheng, et al. Research status and prospect of key aero-engine assembly technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): 527484. (in Chinese)
- [55] 陆健亮. 螺纹拧紧力矩控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Lu Jianliang. Research on screw thread tightening torque control technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [56] 陈佳威. 方向盘转角扭矩传感器性能标定检测系统研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2023.
Chen Jiawei. Research of calibration and detection system for performance of steering wheel angle torque sensor[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2023. (in Chinese)
- [57] 王登泉, 杨明, 叶林, 等. 非接触式旋转轴扭矩测量现状[J]. *电子测量技术*, 2010, 33(6): 8-12.
Wang Dengquan, Yang Ming, Ye Lin, et al. Study of non-contact torque measurement of rotating shaft[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(6): 8-12. (in Chinese)
- [58] 吕明达. 基于图像处理和深度学习的桥梁连接螺栓松动检测方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Lyu Mingda. Study on bridge connecting bolt loosening detection method based on image processing and deep learning[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [59] 成程, 雷雨. 射频识别技术在土木工程中的应用研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(4): 611-616.
Cheng Cheng, Lei Yu. Application of radio frequency identification technology in civil engineering[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(4): 611-616. (in Chinese)
- [60] Wu Jian, Cui Xingmei, Xu Yunpeng. A novel RFID-based sensing method for low-cost bolt loosening monitoring[J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 168.
- [61] Wang Tao, Song Gangbing, Liu Shaopeng, et al. Review of bolted connection monitoring[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(12): 871213.
- [62] Nikraves S M Y, Goudarzi M. A review paper on looseness detection methods in bolted structures[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017, 14(12): 2153-2176.
- [63] Chen Dongdong, Huo Linsheng, Song Gangbing. EMI based multi-bolt looseness detection using series/parallel multi-sensing technique[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 25(4): 423-432.
- [64] Sidorov M, Nhut P V, Matsumoto Y, et al. LoRa-based precision wireless structural health monitoring system for bolted joints in a smart city environment[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 179235-179251.
- [65] 许艺青, 杨晓翔, 韦铁平, 等. 基于正交试验的应变片敏感栅结构参数的优化[J]. *中国测试*, 2018, 44(6): 129-133.
Xu Yiqing, Yang Xiaoxiang, Wei Tieping, et al. Optimization of strain gauge structure parameters based on orthogonal test[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2018, 44(6): 129-133. (in Chinese)
- [66] Zhang Weifang, Zhang Meng, Lan Yudong, et al. Detection of crack locations in aluminum alloy structures using FBG sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 347.
- [67] Guo Yongxing, Li Cong, Zhou Xinglin, et al. Wide-range fiber Bragg grating tilt sensor based on a cam structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(9): 4740-4748.
- [68] Zhang Wenxin, Wang Tao, Yu Wei, et al. FBG-based loosening angle measurement sensor for bolt looseness monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(3): 4254-4260.
- [69] 师琪, 任亮, 尤润州, 等. 基于光纤光栅传感器的智能螺栓开发及应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2020(12): 10-15.
Shi Qi, Ren Liang, You Runzhou, et al. Development and application of smart bolt based on FBG sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(12): 10-15. (in Chinese)
- [70] Herbst F, Chadda R, Peters J, et al. Sensor-integrating bolt for multiaxial force measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(17): 27265-27274.
- [71] Duan Chao, Zhang Hongying, Li Zhuoshu, et al. FBG smart bolts and their application in power grids[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(5): 2515-2521.
- [72] 余伟. 基于光纤光栅的螺栓松转角监测传感器研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
Yu Wei. Research on monitoring sensor of bolt loosening angle based on FBG[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [73] 孙清超, 王鹏, 吴迅, 等. 一种基于螺栓预紧力反馈的航空发动机转子拧紧控制方法及自动化拧紧装备: CN202411156758.4[P]. 2024-09-24.

(编辑: 张 雪)